

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①1 N° de publication : 2 682 473

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : 92 12288

⑤1 Int Cl⁸ : G 01 B 11/24; A 61 C 19/04; G 06 F 15/42

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 14.10.92.

③0 Priorité : 15.10.91 DE 4134117.

④3 Date de la mise à disposition du public de la
demande : 16.04.93 Bulletin 93/15.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche : *Le rapport de recherche n'a pas été
établi à la date de publication de la demande.*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : Société dite: KALTENBACH & VOIGT
GMBH & CO — DE.

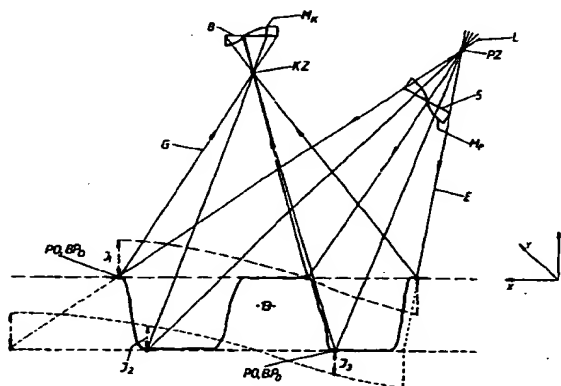
⑦2 Inventeur(s) : Gässler Joachim et Massen Robert.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire : S.A. Fedit-Loriot et Autres Conseils en
Propriété Industrielle.

⑤4 Procédé et dispositif de relèvement optique de la topographie d'objets.

⑤7 Selon ce procédé de relèvement de la topographie d'objets, notamment de dents, selon lequel un projecteur forme sur l'objet l'image d'une trame dont une image est formée sur la surface sensible d'un système photographique et décomposée en points-image dont les intensités lumineuses sont mesurées et mémorisées, et la valeur de phase déterminée à partir des intensités lumineuses et mémorisées, on propose de calculer et mémoriser la position spatiale du point central (PZ) du projecteur, du point central (KZ) de système photographique et des éléments sensibles de la surface sensible, de décomposer la trame située dans le plan de projection en points-image, de calculer et mémoriser leur position spatiale, d'associer entre eux des points-image ayant même valeur de phase et de calculer la position spatiale de droites (G) passant par des points-image ayant même valeur de phase et respectivement le point central (PZ, KZ) du projecteur ou du système photographique, ainsi que les coordonnées spatiales (x, y, z) des points d'intersection de ces droites (G).



FR 2 682 473 - A1



Procédé et dispositif de relèvement optique de la topographie d'objets

La présente invention concerne un procédé de relèvement optique de la topographie d'objets, notamment de dents artificielles ou naturelles, dans la bouche des patients ou à l'extérieur de celle-ci, ce procédé comportant les opérations suivantes :

- 5 a) à l'aide d'au moins un projecteur et en utilisant une forme de faisceau qui diverge à partir d'un point central de ce projecteur, on forme, sur l'objet dont la topographie doit être relevée, l'image d'au moins une trame disposée dans le plan de projection et comportant au moins deux zones ayant des luminosités différentes,
- b) on forme l'image de cette trame, dont l'image est formée sur l'objet, sur la
10 surface sensible d'au moins un système photographique qui est associé au projecteur suivant une position spatiale déterminée et qui est dirigé vers l'objet en faisant un angle de parallaxe vis-à-vis de ce projecteur, cette formation d'image se faisant en utilisant une forme de faisceau qui converge vers un point central de système photographique, et, à l'aide d'éléments sensibles de la surface sensible,
15 on décompose cette trame, dont l'image est formée sur la surface sensible, en points-image distincts, associés au système photographique et appelés ci-après points-image de système, dont on mesure et met en mémoire dans un ordinateur les intensités lumineuses,
- c) à partir des intensités lumineuses des différents points-image de système,
20 on détermine à l'aide de l'ordinateur, et met en mémoire dans ce dernier, ceux dont la valeur de phase coïncide avec la valeur de phase du point-image d'objet formé sur l'objet et associé à ce point-image de système et dépend de la position en hauteur de ce point-image d'objet. L'invention concerne aussi un dispositif de mise en œuvre de ce procédé.
- 25 Un tel procédé, et le dispositif correspondant qui comprend une sonde de mesure comprenant le projecteur et le système photographique, sont connus par US-A-4 952 149 et y sont décrits à l'aide d'un exemple de réalisation basé sur la projection de la trame au moyen de faisceaux lumineux parallèles (projection télécentrique). Il est en outre brièvement mentionné, à titre de variante, la projection à
30 l'aide de faisceaux lumineux divergents (projection centrale).

La projection télécentrique et la projection centrale sont représentées ici respectivement aux figures 1 et 2.

Ainsi que la figure 1 le montre, dans ce procédé connu, une trame rayée M_P , située dans le plan de projection PE du projecteur et comportant une répartition
35 sinusoïdale de luminosité perpendiculairement à la direction des rayures, est projeté, à l'aide des rayons lumineux parallèles L et en faisant un angle d'incidence α , sur l'objet dont la topographie est à relever, représenté par le plan

d'objet OE, ainsi que sur un plan de référence RE, et les images formées respectives M_{OE} et M_{RE} sont enregistrées à l'aide du système photographique, ce qui signifie qu'il en est formé des images sur la surface sensible SF de ce dernier. La différence existant entre les valeurs de phase déterminées à partir des deux enregistrements correspondant à chaque point-image de système BP_K , ou la différence de chemin optique Δx existant entre les ondes sinusoïdales des deux trames M_{OE} et M_{RE} , constitue, conformément à l'équation $\tan \alpha = \Delta x / \Delta z$, une mesure directe de la distance Δz séparant le plan de référence RE du point-image d'objet BP_0 formé sur l'objet ou sur le point correspondant de la surface de l'objet. Etant donné que l'angle d'incidence α est le même pour tous les rayons lumineux projetés, le domaine de validité de cette équation s'étend à tous les points de la surface de l'objet qui sont atteints par ces rayons lumineux projetés.

En raison de l'utilisation de la projection télécentrique, le projecteur utilisé nécessite un système optique dont le diamètre est au moins égal aux diagonales de la surface à éclairer sur l'objet. Il en résulte, pour le relèvement de la topographie de dents dans la bouche des patients, des dimensions de la sonde de mesure qui sont d'une grandeur gênante et donc une maniabilité insuffisante de cette sonde de mesure.

En revanche, la sonde de mesure ou le projecteur comportant un système optique agencé pour la projection centrale a des dimensions considérablement plus faibles et convient donc mieux pour le relèvement de la topographie de dents dans la bouche des patients. La forme divergente du faisceau de ce système optique présente néanmoins un inconvénient dans la mesure où elle exclut l'exploitation de la relation mentionnée ci-dessus existant entre la différence de phase et la distance Δz . En effet, ainsi que la figure 2 le montre, la trame rayée M_{RE} ou M_{OE} projetée sur le plan de référence RE ou le plan d'objet OE présente, vis-à-vis de la trame rayée M_{PE} située dans le plan de projection PE, une distorsion correspondant à la différence des angles d'incidence α , β des différents rayons lumineux L. En d'autres termes, le système photographique observe un décalage du plan de référence égal à Δz non plus, comme dans la projection télécentrique, comme un décalage unique pour la valeur de phase de la trame rayée, mais comme un mélange de déphasage et de variation différente des longueurs d'onde. Ainsi, les valeurs de distance Δz relevées contiennent, de même que l'image-profil de l'objet qui en est déduite, des valeurs d'erreur qui sont différentes et correspondent aux différentes distorsions des longueurs d'onde.

L'invention a pour but de perfectionner un procédé et un dispositif, du type mentionné dans le préambule, d'une façon telle que l'image-profil de l'objet puisse être relevée sans erreur.

A cet effet, l'invention a pour objet un dispositif de relèvement optique de la

topographie d'objets, du type mentionné dans le préambule,
caractérisé :

5 d) en ce que la position spatiale, rapportée à un système de coordonnées de référence, du point central du projecteur et du point central du système photographique, ainsi que des éléments sensibles de la surface sensible, est déterminée et mise en mémoire dans l'ordinateur,

10 e) en ce que la trame située dans le plan de projection du projecteur est décomposée en points-image associés au projecteur et appelés ci-après points-image de projecteur et la position spatiale, rapportée au système de coordonnées de référence, de chacun de ces points-image est déterminée et mise en mémoire dans l'ordinateur,

f) en ce que des points-image de système et des points-image de projecteur ayant une même valeur de phase sont associés entre eux à l'aide de l'ordinateur et

15 g) en ce que l'ordinateur détermine la position spatiale, rapportée au système de coordonnées de référence, de droites imaginaires, respectivement associées au projecteur et au système photographique, passant par les points-image de projecteur et de système ayant la même valeur de phase et associés entre eux et respectivement le point central du projecteur et le point central du système photographique, ainsi que les coordonnées spatiales des points
20 d'intersection de ces droites et donc la position spatiale des points-image d'objet ou des points de surface d'objet qui leur sont respectivement associés.

L'invention a aussi pour objet un dispositif de mise en œuvre de ce procédé, caractérisé en ce que le projecteur comprend une unité d'affichage à cristaux liquides, située dans le plan de projection et agencée de façon à pouvoir être
25 commandée à l'aide d'une matrice d'affichage à cristaux liquides en vue de produire différentes trames, une source de lumière et un système optique dont les rayons lumineux divergents rencontrent l'unité d'affichage à cristaux liquides de façon à former l'image des trames sur l'objet dont la topographie est à relever, en ce que le système photographique est un système photographique à photodiodes
30 à charge couplée qui comprend une unité à photodiodes à charge couplée dont la matrice de photodiodes à charge couplée décompose la trame enregistrée en différents points-image (de matrice) de système, en ce que, pour chaque point-image (de matrice) de projecteur, l'ordinateur envoie à l'unité d'affichage à cristaux liquides un signal de luminosité correspondant à la trame à produire, en ce que,
35 pour chaque point-image (de matrice) de système, le système photographique à photodiodes à charge couplée envoie à l'ordinateur un signal de traitement correspondant à la luminosité mesurée de ce point-image et en ce que l'ordinateur procède à l'association des points-image de la matrice d'affichage à cristaux liquides et de la matrice à photodiodes à charge couplée, ainsi qu'au calcul des

coordonnées spatiales des points-image d'objet ou des points de surface d'objet .

La forme divergente du faisceau de la projection centrale, qui a conduit à des erreurs dans le procédé, utilisé jusqu'à présent, de détermination de la position en hauteur des différents points de surface d'objet ou de la distance de ces
5 derniers vis-à-vis du plan de référence, constitue la base du procédé conforme à l'invention et est utilisée par ce dernier procédé pour déterminer sans erreur la position en hauteur des points de la surface de l'objet. Le procédé conforme à l'invention est caractérisé par de faibles besoins en temps et en calcul ; c'est ainsi par exemple qu'est supprimé l'enregistrement, nécessaire dans l'état de la tech-
10 nique, de l'image de phase de référence qui représente, sur la surface sensible du système photographique, la valeur des phases de la trame projetée sur le plan de référence ; conformément à l'invention, la position des différents points de la surface de l'objet est directement fournie par les coordonnées spatiales de ces derniers, de sorte que sont supprimées la conversion de la distance Δz en hauteurs
15 ou coordonnées z et la combinaison de ces dernières avec les coordonnées x , y déterminées séparément, conversion et combinaison qui étaient nécessaires dans l'état de la technique. En ce qui concerne le dispositif conforme à l'invention, la projection centrale permet l'utilisation de sondes de mesure ayant des dimensions plus faibles et se présentant par exemple sous la forme d'endoscopes miniaturisés
20 dans lesquels le système photographique et le projecteur sont disposés et qui sont raccordés à l'ordinateur.

Afin d'éviter des ambiguïtés lors de l'association des points-image de système et des points-image de projecteur ayant la même valeur de phase, on peut former sur l'objet l'image d'une trame qui comporte une répartition de luminosité
25 lors du traitement de laquelle il existe des valeurs de phase pour les points-image de projecteur et les points-image de système qui sont différentes, mais ne se présentent chacune qu'une fois. Cette manière de procéder permet que les points-image de système et donc aussi les points-image de projecteur possèdent chacun des valeurs de phase qui sont différentes.

30 Les exigences concernant la précision de mesure de la surface sensible et du contraste de luminosité peuvent être réduites, sans perte de précision pour les valeurs de phase déterminées, si on forme sur l'objet l'image d'une trame comportant des valeurs de même luminosité se répétant périodiquement, par exemple une trame rayée comportant une répartition de luminosité analogique, de
35 préférence sinusoïdale, transversalement à la direction des rayures. Lorsque le nombre des rayures devient plus grand, la résolution et donc la densité de mesure augmentent, mais aussi le risque d'ambiguïtés lors de l'association des points-image de système et des points-image de projecteur. Dans ce cas, il est judicieux qu'il soit formé sur l'objet, et traité, au moins deux trames rayées, une première

trame rayée grossière comportant un nombre plus petit de rayures successives et une seconde trame rayée fine comportant un nombre plus grand de rayures successives, tandis que les ambiguïtés de l'association des points-image de système et de projecteur ayant la même valeur de phase, ambiguïtés qui
5 proviennent de la résolution plus élevée de la seconde trame rayée sont exclues par prise en considération des points-image de système et de projecteur de la première trame rayée qui ont la même valeur de phase.

Lors de l'utilisation d'une trame rayée, il est avantageux de décomposer cette dernière dans le plan de projection en lignes de points-image s'étendant
10 dans la direction des rayures et de déterminer la position spatiale de plans imaginaires passant par les lignes de points-image et le point central de projecteur, ainsi que les coordonnées spatiales des points d'intersection de ceux de ces plans et de celles des droites de système qui passent par les lignes de points-image ou les points-image de système qui ont la même valeur de phase.

15 Suivant un autre développement de l'invention, il est formé au moins trois fois sur l'objet une image de la trame rayée avec chaque fois une valeur de phase décalée du même angle de phase transversalement à la direction des rayures et cette image de la trame est traitée conformément à la méthode connue de décalage de phase pour la détermination précise de la valeur de phase des points-
20 image de système.

L'invention est décrite ci-après à l'aide d'un exemple de réalisation préféré et en regard des figures 3 à 6, les figures 1 et 2 étant des représentations schématiques des procédés optiques de mesure, respectivement à projection télécentrique et à projection centrale, connus par l'état de la technique. On voit :

25 à la figure 3, une représentation schématique de l'exemple de réalisation préféré du dispositif conforme à l'invention,

à la figure 4, une représentation schématique du procédé conforme à l'invention,

30 à la figure 5, une représentation de ce qu'il est convenu d'appeler la méthode hiérarchique comportant la projection successive de plusieurs trames rayées sinusoïdales et,

à la figure 6, une représentation de ce qu'il est convenu d'appeler la méthode de décalage de phase comportant la projection successive de plusieurs trames rayées sinusoïdales.

35 Le dispositif représenté à la figure 3 comprend un ordinateur 1 et une sonde de mesure 2 dans laquelle un projecteur 3 et un système photographique 4 sont disposés. Le projecteur 3 est agencé pour la projection centrale et est d'une structure classique comportant une source de lumière, non représentée, un système optique, également non représenté et comportant un miroir concave, un

condenseur et un objectif de projection, et une unité d'affichage à cristaux liquides 5 disposée entre le condenseur et l'objectif de projection et éclairée en lumière transmise. Le miroir concave recueille la lumière émanant de la source de lumière et forme en lui-même l'image de cette source de lumière. Le condenseur intercepte un angle solide important du rayonnement et donne une image de la source de lumière dans l'objectif de projection dont le foyer est appelé ici point central de projecteur PZ et dont les rayons lumineux s'éloignent sous la forme d'un faisceau divergent. Pour simplifier, ce point central de projecteur PZ est représenté aux figures 3 et 4 avant l'unité d'affichage à cristaux liquides 5 dans le trajet du faisceau. L'unité d'affichage à cristaux liquides 5 comprend une matrice d'affichage à cristaux liquides à deux dimensions qui comporte des lignes $BPZ_{(x)}$, $BPZ_{(y)}$ de points-image s'étendant dans la direction X et dans la direction Y et constituées de points-image (de matrice) BP_P associés au projecteur et appelés ci-après points-image (de matrice) de projecteur, ces lignes de points-image étant agencées de façon à pouvoir être activées par l'ordinateur 1, sous la commande de signaux d'intensité $I_{(x)}$, $I_{(y)}$ et par l'intermédiaire de lignes de commande 6 et 7, de façon à produire différentes trames. Les données concernant ces trames sont en mémoire dans l'ordinateur 1.

Le système photographique 4 est un système photographique à photodiodes à charge couplée, d'un type classique, comprenant un système optique non représenté et une unité de photodiodes à charge couplée 8, disposée dans un plan image et servant de surface sensible, qui comporte une matrice de photodiodes à charge couplée à deux dimensions dont les éléments photosensibles 9 sont disposés dans la direction X et la direction Y et sont agencés de façon à pouvoir être commandés par l'application d'impulsions de commande $T_{(x)}$, $T_{(y)}$ provenant de l'ordinateur 1 par des lignes de commande respectivement 10 et 11. Les impulsions électriques ou signaux électriques de traitement $I_{(x)}$, $I_{(y)}$, qui sont disponibles d'une manière séquentielle à la sortie de l'unité de photodiodes à charge couplée 8 et sont proportionnels à l'intensité I du faisceau lumineux leur parvenant, sont envoyés à l'ordinateur 1 par une ligne de signaux 12. Etant donné que le système optique du système photographique forme de manière inversée sur l'unité de photodiodes à charge couplée 8, l'image d'un objet 13 dont la topographie est à relever, par exemple une dent, et que donc la forme du faisceau diverge dans les deux directions à partir du foyer de ce système optique, le système photographique est représenté, pour simplifier, sous la forme d'une *camera oscura* à sténopé qui offre la même forme de faisceau et dans l'orifice d'entrée de laquelle est situé le point d'intersection des rayons lumineux L qui est représenté sous la forme du point central de système photographique KZ.

Le point central de projecteur PZ, le point central de système KZ, l'unité

d'affichage à cristaux liquides 5 et l'unité à photodiodes à charge couplée 8 sont disposés dans une position spatiale déterminée à l'intérieur d'un système de coordonnées de référence qui est fixé lors du calibrage du projecteur 3 et du système photographique 4 qui est réalisé de préférence à l'aide de ce qu'il est convenu d'appeler un équilibrage de faisceau. Les axes optiques OAP et OAK du projecteur 3 et du système photographique 4 font entre eux un angle de parallaxe γ .

On décrit ci-après le fonctionnement du dispositif conforme à l'invention en utilisant, à l'appui, le relèvement de la topographie de dents dans la bouche d'un patient :

On maintient la sonde de mesure 2 au-dessus de la dent 13 dont la topographie est à relever et on la fait passer sur "fonctionnement" afin de mettre en marche le relèvement de topographie qui se déroule comme suit. A l'aide du projecteur 3, on forme successivement sur la dent 13 l'image de quatre premières trames rayées et quatre secondes trames rayées respectivement $M1_1 - M1_4$ et $M2_1 - M2_4$ (représentés à la figure 5 sous la forme M1 et M2). A cet effet, l'ordinateur 1 commande l'unité d'affichage à cristaux liquides 5 du projecteur 3 à l'aide de signaux de commande $I(x)$, $I(y)$ correspondant à la trame rayée chaque fois considérée, d'une façon telle que les points-image BP_P , chaque fois associés, de la matrice d'affichage à cristaux liquides sont activés et constituent la trame rayée chaque fois associée (représentée à la figure 4 par M_P à titre représentatif pour $M1_1 - M1_4$ et $M2_1 - M2_4$). Les rayons lumineux L qui émanent du point central de projecteur PZ et qui sont modulés par la trame rayée M_P produite par l'unité d'affichage à cristaux liquides 5 sont projetés sur la dent 13 et forment sur cette dernière l'image de la trame rayée chaque fois considérée, cette image subissant une distorsion correspondant à la topographie de la dent 13 ou faisant l'objet d'un décalage de phase aux différents points de surface d'objet PO d'une manière correspondant à la position en hauteur (coordonnée z) de ces points.

Toutes les trames rayées $M1_1 - M1_4$ et $M2_1 - M2_4$ comportent une répartition analogique de luminosité présentant une variation sinusoïdale suivant la direction X de l'unité d'affichage à cristaux liquides 5. Ainsi que la figure 5 le montre, le nombre d'ondes, ou répétence, des secondes trames rayées $M2_1 - M2_4$ (représentées sous la forme M2) est quatre fois plus grand que le nombre d'ondes ayant la valeur 1 pour les premières trames rayées $M1_1 - M1_4$ (représentées sous la forme M1). Ainsi que la figure 6 le montre, les secondes trames rayées $M2_1 - M2_4$ sont identiques, mais déphasées deux à deux de 90° . Il en est de même pour les premières trames rayées $M1_1 - M1_4$ (non représentées).

Chacune des trames rayées $M1_1 - M1_4$ et $M2_1 - M2_4$ dont les images sont formées sur la dent 13 est enregistrée par le système photographique 4, ce qui signifie qu'une image en est formée sur l'unité à photodiodes à charge couplée 8

de ce système photographique (cette image est représentée à la figure 4 par M_K), et cette image est décomposée par les éléments sensibles 9 en différents points-image de système BP_K . Par les lignes de commande 10, 11, l'ordinateur 1 rend actifs ces éléments sensibles 9 qui produisent de ce fait des impulsions électriques $I(x)$, $I(y)$ qui correspondent à l'intensité lumineuse I des points-image BP_K résultant chaque fois d'une interférence et qui sont envoyées d'une manière séquentielle à l'ordinateur 1 par la ligne de signaux 12 et sont traitées dans cet ordinateur conformément à la méthode de décalage de phase hiérarchisé.

En vertu de la formule

$$I(x, y) = I_m(x, y) [1 + K(x, y) \cos(\phi(x, y) + \Delta\phi)].$$

l'intensité lumineuse $I(x, y)$ mesurée pour chaque point-image de système BP_K constitue une mesure de la valeur de phase ϕ de ce point-image, laquelle constitue elle-même une mesure de la position en hauteur (coordonnée z) du point de surface d'objet PO sur lequel est formée l'image du point-image d'objet BP_O considéré.

Bien qu'il suffise de trois équations, à savoir les mesures d'intensité lumineuse de trois premières et trois secondes trames rayées respectivement $M1_1 - M1_3$ et $M2_1 - M2_3$ chaque fois déphasées, pour déterminer les trois inconnues I , I_m (= luminosité de base, c'est-à-dire luminosité de l'objet sans que l'image d'une trame soit formée sur lui) et K (contraste de la trame), on intègre chaque fois dans le relèvement de topographie ou traitement du présent exemple de réalisation, conformément au procédé qu'il est convenu d'appeler à quatre décalages de phase, une quatrième trame rayée déphasée, à savoir respectivement $M1_4$ ou $M2_4$, ce qui simplifie considérablement les opérations de calcul permettant de déterminer la valeur de phase ϕ .

A partir de chacune des deux séquences des premières et des secondes trames rayées $M1_1 - M1_4$ et $M2_1 - M2_4$ enregistrées par le système photographique 4, l'ordinateur 1 détermine, pour chaque point-image de système BP_K , la valeur de phase ϕ , qui dépend du contraste et de la luminosité de base, ou, pour la totalité de tous les points-image de système BP_K , l'image de phase correspondante, sur la base de l'équation

$$\phi(x, y) = \text{Arc tg} [(I_{270^\circ}(x, y) - I_{90^\circ}(x, y)) / (I_{180^\circ}(x, y) - I_{0^\circ}(x, y))].$$

Des zones de ces images de phase ainsi déterminées dont la luminosité et le contraste sont situés à l'extérieur d'un intervalle préfixé sont éliminées par masquage par l'ordinateur 1, ce qui signifie que la valeur de phase des points-image BP_K correspondants est remplacée par un mot code approprié et est de fait exclue de la suite du traitement. L'image de luminosité $I_m(x, y)$ et l'image de contraste $K(x, y)$ sont nécessaires à cet effet. Elles sont calculées l'une et l'autre directement à partir des quatre premières et quatre secondes trames rayées $M1_1 -$

M14 et M2₁ - M2₄ déphasées entre elles, de la manière qui suit :

$$I_m(x,y) = 0,25 \times (I_{0^\circ}(x,y) + I_{90^\circ}(x,y) + I_{180^\circ}(x,y) + I_{270^\circ}(x,y))$$

$$K_{(x,y)} = \sqrt{(I_{90^\circ}(x,y) - I_{0^\circ}(x,y))^2 + (I_{180^\circ}(x,y) - I_{270^\circ}(x,y))^2}$$

5 Cette élimination par marquage permet d'empêcher que toutes les zones de non validité, telles que par exemple zones marginales, zones d'ombre, emplacements réfléchissant d'une manière excessivement intense et analogues, ne passent dans le traitement et ne conduisent à des erreurs du relèvement optique de la topographie.

10 L'ordinateur 1 calcule la position spatiale, rapportée au système de coordonnées de référence, de droites imaginaires G passant par les points-image BP_K et le point central de système KZ. L'ordinateur 1 détermine en outre la position spatiale, rapportée au système de coordonnées de référence, de plans imaginaires E (représentés à la figure 4 par des droites) qui passent par les lignes de points-image BPZ_(x) de la matrice d'affichage à cristaux liquides et le point central de
15 projecteur PZ, afin de déterminer ensuite à partir des équations de droite et de plan, pour chacune des deux images de phase obtenues après masquage, les coordonnées spatiales x, y, z des points d'intersection des plans E et des droites G qui passent respectivement par des lignes de points-image de projecteur BPZ_(x) et des points-image de système BP_K ayant une même valeur de phase. Les calculs
20 reposent sur des procédés mathématiques connus. L'ensemble des points d'intersection déterminés à partir de chaque image de phase constitue une image topographique de la surface de la dent dont le relèvement est à effectuer, étant donné que chaque point d'intersection est identique au point de surface d'objet PO sur lequel parviennent le rayon lumineux incident dans le plan E correspondant et
25 le rayon lumineux réfléchi suivant la droite G correspondante et sur lequel est formée, sous la forme d'un point-image d'objet BP_O, l'image du point-image de projecteur BP_K correspondant. Cette situation est représentée à la figure 4, en tout état de cause à l'aide de la trame rayée M_p qui comporte une répartition sinusoïdale de luminosité présentant des valeurs de luminosité chaque fois différentes,
30 mais ne se présentant qu'une fois. En d'autres termes, l'onde sinusoïdale représentant la trame rayée s'étend sur un domaine angulaire de 180°, plus précisément du point d'amplitude positive maximale au point d'amplitude négative maximale. Dans une telle trame rayée, les plans E et les droites G déterminent respectivement des lignes de points-image de projecteur BPZ_(x) et des points-image de système
35 BP_K ayant une valeur de phase chaque fois différente, de sorte qu'il ne se présente aucune ambiguïté lors de l'association des droites G et des plans E, ce qui signifie que des droites et des plans peuvent être associés chaque fois deux à deux afin que leurs points d'intersection puissent être déterminés.

Il ne se présente pas non plus d'ambiguïtés (changements brusques de

phase), en ce qui concerne la valeur de phase des points-image de projecteur et des points-image de système, lors du traitement de l'image de phase déterminée à partir de la séquence des premières trames rayées M1₁ et M1₄ avec un nombre d'ondes de ces trames rayées qui est faible et réglé d'une manière appropriée, 5 mais la résolution de l'image topographique obtenue est trop faible pour les conditions exigées. C'est la séquence des secondes trames rayées M2₁- M2₄ comportant un nombre d'ondes convenablement plus élevé qui sert pour obtenir la résolution exigée, mais, lors du traitement de ces secondes trames rayées de la manière prescrite, il peut se présenter des ambiguïtés en ce qui concerne 10 l'association des droites et des plans ayant chaque fois la même valeur de phase. Ces ambiguïtés sont écartées par combinaison et déploiement hiérarchisé des deux images de phase, l'ordinateur associant entre eux les droites et plans pouvant être associés d'une manière ambiguë, de façon telle que les points d'intersection obtenus soient situés à l'intérieur du domaine attendu résultant de la 15 topographie de la dent déterminée précédemment sur la base des premières trames rayées M1₁ - M1₄. Ces points d'intersection, qui constituent, dans leur ensemble, une image topographique définie et définitive de la surface de la dent, sont envoyés par l'ordinateur 1, par l'intermédiaire de la ligne de signaux 14, par exemple au tour à commande numérique en vue de produire par exemple une 20 copie de la dent dont la topographie a été relevée.

Pour produire les trames, on pourrait, à la place de l'unité d'affichage à cristaux liquides, utiliser aussi des réseaux rayés, des dispositifs laser interférométriques agencés de façon à pouvoir être déplacés en translation par des moyens mécaniques et comportant des miroirs de déviation réglables et d'autres dispositifs 25 connus.

Pour pouvoir enregistrer plusieurs vues partielles de l'objet dont la topographie doit être relevée, de façon qu'elles puissent être assemblées en une image d'ensemble, il est avantageux d'utiliser une sonde de mesure qui, à la place d'un système photographique et d'un projecteur, contient plusieurs projecteurs et 30 systèmes photographiques associés deux à deux.

REVENDICATIONS

1. Procédé de relèvement optique de la topographie d'objets, notamment de dents artificielles ou naturelles, dans la bouche des patients ou à l'extérieur de celle-ci, ce procédé comportant les opérations suivantes :

5 a) à l'aide d'au moins un projecteur et en utilisant une forme de faisceau qui diverge à partir d'un point central de ce projecteur, on forme, sur l'objet dont la topographie doit être relevée, l'image d'au moins une trame disposée dans le plan de projection et comportant au moins deux zones ayant des luminosités différentes,

10 b) on forme l'image de cette trame, dont l'image est formée sur l'objet, sur la surface sensible d'au moins un système photographique qui est associé au projecteur suivant une position spatiale déterminée et qui est dirigé vers l'objet en faisant un angle de parallaxe vis-à-vis de ce projecteur, cette formation d'image se faisant en utilisant une forme de faisceau qui converge vers un point central de système photographique, et, à l'aide d'éléments sensibles de la surface sensible, on décompose cette trame, dont l'image est formée sur la surface sensible, en
15 points-image distincts, associés au système photographique, dont on mesure et met en mémoire dans un ordinateur les intensités lumineuses,

c) à partir des intensités lumineuses des différents points-image de système, on détermine à l'aide de l'ordinateur, et met en mémoire dans ce dernier, ceux dont la valeur de phase coïncide avec la valeur de phase du point-image d'objet formé
20 sur l'objet et associé à ce point-image de système et dépend de la position en hauteur de ce point-image d'objet,

caractérisé :

d) en ce que la position spatiale, rapportée à un système de coordonnées de référence, du point central (PZ) du projecteur et du point central (KZ) du système
25 photographique, ainsi que des éléments sensibles (9) de la surface sensible (8), est déterminée et mise en mémoire dans l'ordinateur (1),

e) en ce que la trame (M_p ; M_1 , M_2 ; M_{11} - M_{14} , M_{21} - M_{24}) située dans le plan de projection du projecteur (3) est décomposée en points-image de projecteur (BP_p) et la position spatiale, rapportée au système de coordonnées de référence,
30 de chacun de ces points-image est déterminée et mise en mémoire dans l'ordinateur (1),

f) en ce que des points-image de système (BP_K) et des points-image de projecteur (BP_p) ayant une même valeur de phase sont associés entre eux à l'aide de l'ordinateur (1) et

35 g) en ce que l'ordinateur (1) détermine la position spatiale, rapportée au système de coordonnées de référence, de droites imaginaires (G), respectivement au projecteur et au système photographique, passant par les points-image de projecteur et de système (BP_p , BP_K) ayant la même valeur de phase et associés

entre eux et respectivement le point central (PZ) du projecteur et le point central (KZ) du système photographique, ainsi que les coordonnées spatiales (x, y, z) des points d'intersection de ces droites (G) et donc la position spatiale des points-image d'objet (BP_O) ou des points de surface d'objet (PO) qui leur sont
5 respectivement associés.

2. Procédé suivant la revendication 1, caractérisé en ce qu'en tant que trame, c'est une trame rayée (M_P ; M_1, M_2 ; $M_{11} - M_{14}, M_{21} - M_{24}$) dont l'image est formée sur l'objet (13) et est décomposée, dans le plan de projection, en lignes de points-image ($BPZ_{(x)}$) s'étendant suivant la direction des rayures et en ce qu'il est
10 procédé à la détermination de la position spatiale de plans imaginaires (E) passant par les lignes de points-image ($BPZ_{(x)}$) et le point central de projecteur (PZ), ainsi que des coordonnées spatiales (x, y, z) des points d'intersection des plans (E) et des droites de système (G) qui passent respectivement par les lignes de points-image ($BPZ_{(x)}$) et les points-image de système (BP_K) ayant la même valeur de
15 phase.

3. Procédé suivant la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que l'image de la trame (M_P ; M_1, M_2 ; $M_{11} - M_{14}, M_{21} - M_{24}$) peut être faite sur l'objet (13) avec une répartition analogique de la luminosité.

4. Procédé suivant la revendication 3, caractérisé en ce que l'image de la
20 trame (M_P ; M_1, M_2 ; $M_{11} - M_{14}, M_{21} - M_{24}$) est faite sur l'objet (13) avec une répartition sinusoïdale de la luminosité.

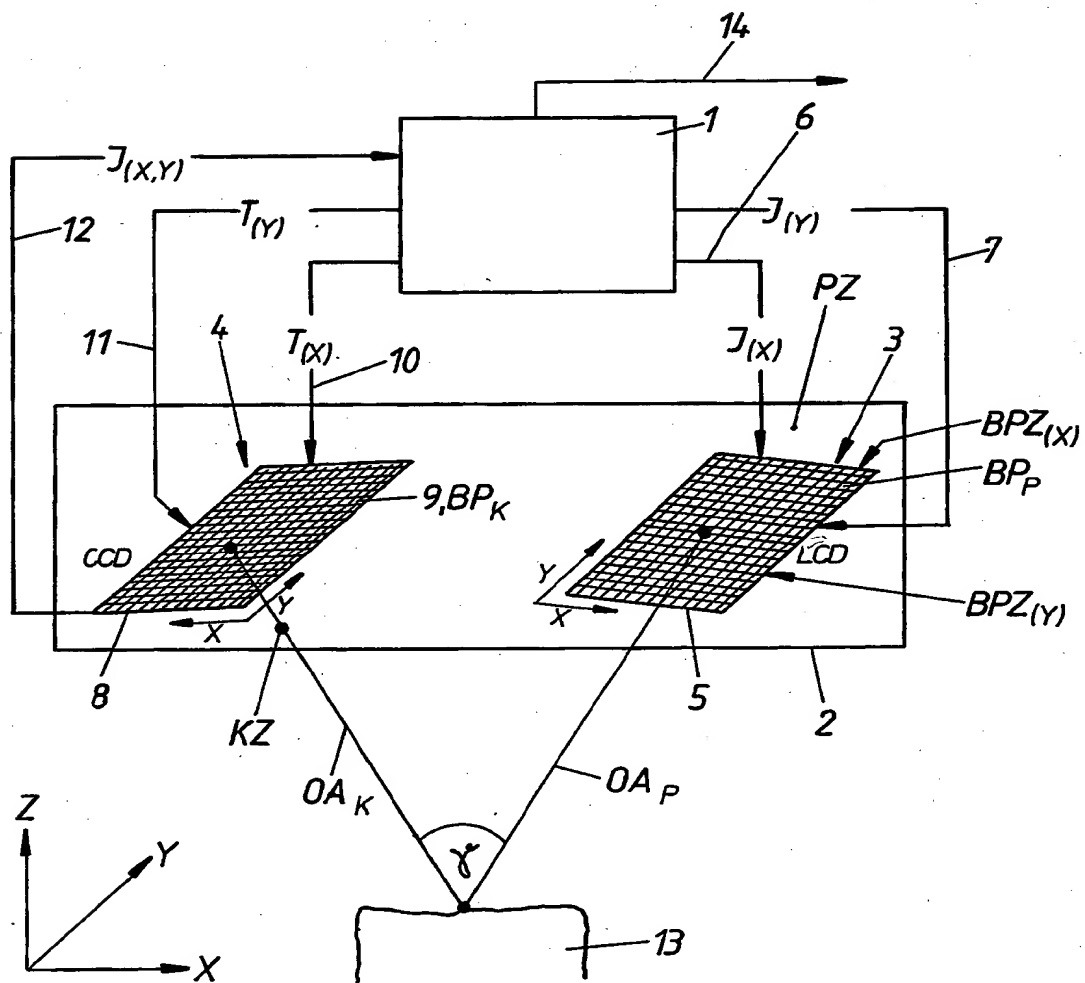
5. Procédé suivant l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce qu'il est formé sur l'objet (13), et traité, au moins deux trames rayées, une première trame rayée grossière (M_1) comportant un nombre plus petit de rayures successives et
25 une seconde trame rayée fine (M_2) comportant un nombre plus grand de rayures successives, et en ce que les ambiguïtés de l'association des points-image (BP_K, BP_P) ou des lignes de points-image ($BPZ_{(x)}$) de système et de projecteur ayant la même valeur de phase, ambiguïtés qui proviennent de la résolution plus élevée (du plus grand nombre de points-image ayant la même valeur de phase) de la
30 seconde trame rayée (M_2) sont exclues par prise en considération des points-image de système et de projecteur (BP_K, BP_P) ou des lignes de points-image ($BPZ_{(x)}$) de la première trame rayée (M_1) qui ont la même valeur de phase.

6. Procédé suivant l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce qu'il est formé au moins trois fois ($M_{11} - M_{14}, M_2 - M_{24}$) sur l'objet (321) une image de la
35 trame rayée (M_1, M_2) avec chaque fois une valeur de phase décalée du même angle de phase ($\Delta\phi$) transversalement à la direction des rayures et cette image de la trame est traitée conformément à la méthode connue de décalage de phase pour la détermination précise de la valeur de phase des points-image de système (BP_K).

7. Dispositif de mise en œuvre d'un procédé suivant la revendication 1,

caractérisé en ce que le projecteur (3) comprend une unité d'affichage à cristaux liquides (5), située dans le plan de projection et agencée de façon à pouvoir être commandée à l'aide d'une matrice d'affichage à cristaux liquides en vue de produire différentes trames (M_P , M_2 , M_2 ; $M_{11} - M_{14}$; $M_{21} - M_{24}$), une source de lumière et un système optique dont les rayons lumineux divergents (L) rencontrent l'unité d'affichage à cristaux liquides (5) de façon à former l'image des trames (M_P ; M_1 , M_2 ; $M_{11} - M_{14}$; $M_{21} - M_{24}$) sur l'objet (13) dont la topographie est à relever, en ce que le système photographique (4) est un système photographique à photodiodes à charge couplée qui comprend une unité à photodiodes à charge couplée (8) dont la matrice d'affichage commandée par ordinateur décompose la trame enregistrée (M_P ; M_2 , M_2 ; $M_{11} - M_{14}$; $M_{21} - M_{24}$) en différents points-image (de matrice) de système (BP_K), en ce que, pour chaque point-image (de matrice) de projecteur (BP_P), l'ordinateur (1) envoie à l'unité d'affichage à cristaux liquides (5) un signal de luminosité ($I_{(x)}$, $I_{(y)}$) correspondant à la trame (M_P ; M_1 , M_2 ; $M_{11} - M_{14}$; $M_{21} - M_{24}$) à produire, en ce que, pour chaque point-image (de matrice) de système (BP_K), le système photographique à photodiodes à charge couplée envoie à l'ordinateur (1) un signal de traitement ($I_{(x, y)}$) correspondant à la luminosité mesurée de ce point-image et en ce que l'ordinateur (1) procède à l'association des points-image (BP_P , BP_K) de la matrice d'affichage à cristaux liquides et de la matrice à photodiodes à charge couplée, ainsi qu'au calcul des coordonnées spatiales (x, y, z) des points-image d'objet (BP_O) ou des points de surface d'objet (PO).

FIG. 3



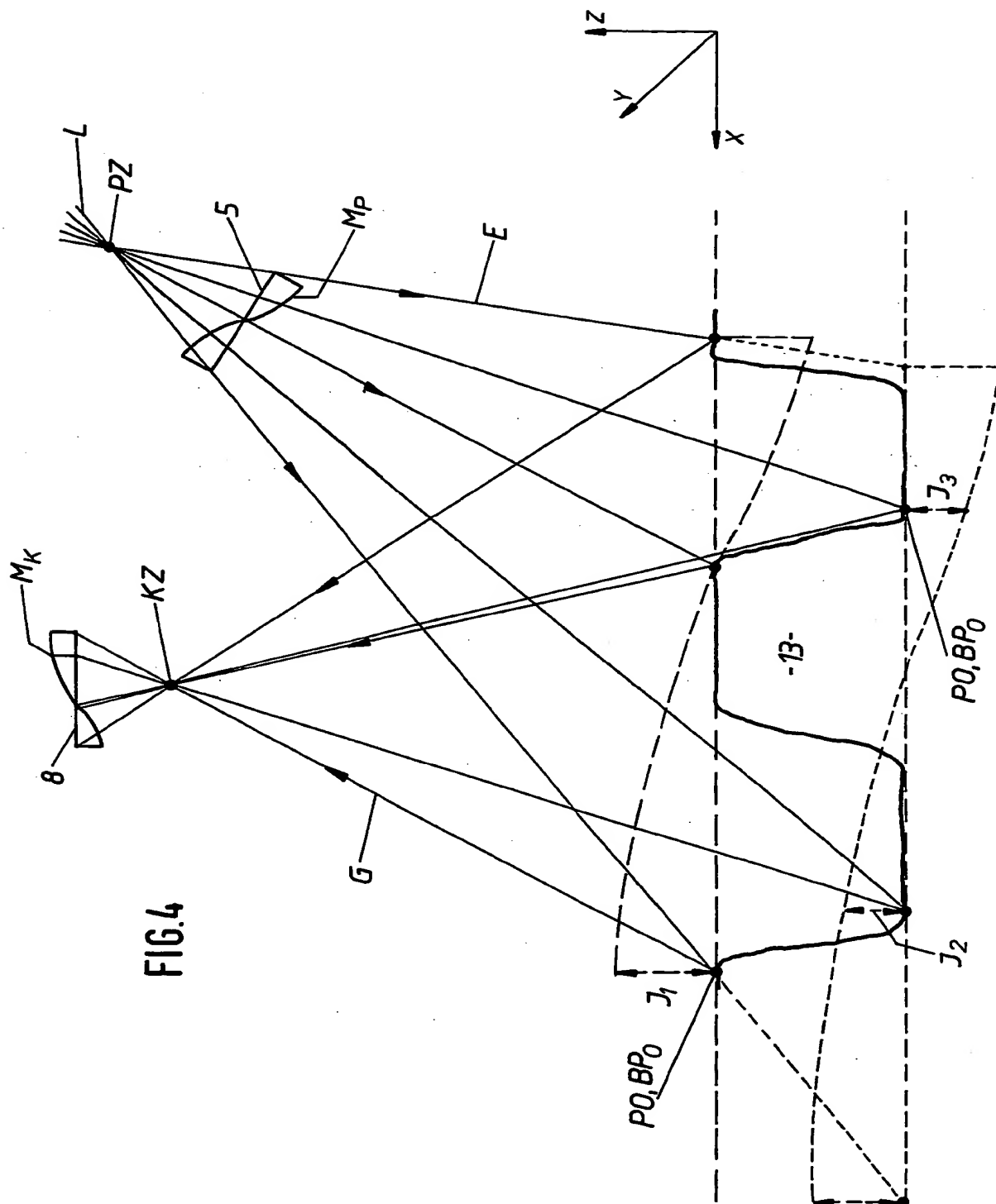


FIG. 5

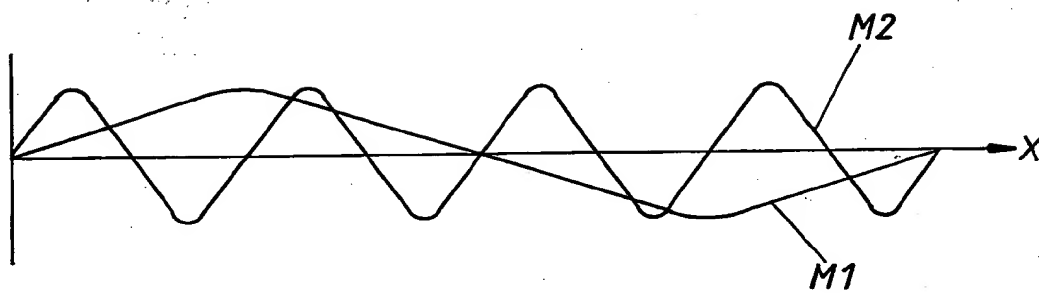


FIG. 6

